应用生态学报
Chinese Journal of Applied Ecology
ISSN 1001-9332,CN 21-1253/Q

《应用生态学报》网络首发论文

题目：基于地理探测器的丹霞梧桐空间分布与生境因子相关性
作者：吴家荣，韦宝婧，胡希军，朱满乐，李芮芝，冯雪晨
DOI：10.13287/j.1001-9332.202008.018
收稿日期：2020-03-25
网络首发日期：2020-06-16
引用格式：吴家荣，韦宝婧，胡希军，朱满乐，李芮芝，冯雪晨．基于地理探测器的丹霞梧桐空间分布与生境因子相关性．应用生态学报.
https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202008.018

网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于地理探测器的丹霞梧桐空间分布与生境因子相关性

吴家荣　韦宝婧　胡希军✉　朱满乐　李芮芝　冯雪晨

（中南林业科技大学风景园林学院，长沙 410000）
✉通信作者　胡希军,E-mail:120795043@qq.com

摘要　丹霞梧桐是中国丹霞地貌的特有种，识别影响其分布的主要环境驱动因子，可为保护丹霞梧桐及其生境提供科学依据。本研究以广东南雄丹霞梧桐县级自然保护区与广东丹霞山旅游风景区（核心景区）为研究区，运用地理探测器分析丹霞梧桐空间分布与两地生境因子的相关性（用 q 值衡量），分析要素包括地理要素（地貌形态成因类型、土壤亚类、高程、坡度、坡向）和气候要素（年均降水、年日照时数、年均相对湿度、年均风速）。结果表明：影响丹霞梧桐空间分布的主要生境因子为土壤亚类、年日照时数、地貌形态成因类型。其中，丹霞梧桐生境的各因子相关性分析中，土壤亚类、年日照时数和地貌形态成因类型的 q 值大于所有因子 q 值的均值，具有较强相关性；丹霞梧桐生境因子的两两组合中，地貌形态成因类型∩年日照时数和土壤亚类∩年日照时数的交互作用表现为双因子增强且 q 值大于所有组合 q 值的均值，具有较强相关性；丹霞梧桐空间分布相关性的生态探测中，与其他各因子相比，土壤亚类、年日照时数以及地貌形态成因类型的 q 值具有显著差异。丹霞梧桐的空间分布主要与土壤亚类、地貌形态成因类型、年日照时数存在显著相关性，同时也表明，地理探测器为植被生境因子分析、预测物种分布等研究提供了有益的方法探索。

关键词　丹霞梧桐；生境因子；地理探测器；空间相关性
DOI: 10.13287/j.1001–9332.202008.018

Correlation of spatial distribution and habitat factors of Firmiana danxiaensis based on GeoDetector

WU Jia-rong, WEI Bao-jing, HU Xi-jun✉, ZHU Man-le, LI Rui-zhi, FENG Xue-chen

(School of Landscape Architecture, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410000, China)

Abstract　Firmiana danxiaensis is an endemic species of Danxia landform in China. Identifying the main environmental driving factors affecting its distribution can provide scientific basis for protecting F. danxiaensis and its habitat. This research took the F. danxiaens Nature Reserve in Nanxiong City and the Guangdong Danxia Mountain Tourism Scenic Area (core scenic area) as research areas, and used GeoDetector to analyze the correlation (measured by q value) between the spatial distribution of F. danxiaens and its habitat factors of the two place, the analysis factors included geographical elements (geomorphological type, soil subtype, elevation, slope, aspect) and climatic elements (annual precipitation and annual sunlight ratio, mean annual relative humidity and mean annual wind speed). The research results showed that the main habitat factors affecting the spatial distribution of F. danxiaensis were soil subtype, annual sunslight ratios and geomorphologic genesis type. Among them, the q values of soil subtype, annual sunlight ratios and geomorphologic genesis types were higher than the mean values of all factors in the correlation analysis of various factors in the habitat of F. danxiaensis. In the pairwise combination of habitat factors, the interaction between geomorphologic genesis types ∩ annual sunlight ratios and soil subtypes ∩ annual sunlight ratios was enhanced by two factors and the q value was greater than the mean value of all combinations which showing a strong correlation. Compared with other factors, the q value of soil subtypes, annual sunlight ratios and

收稿日期：2020-03-25
基金项目：国家林业局野生植物保护项目和韶关市野生动植物保护办公室项目(2016ZWZY06)；国家林业和草原局“十三五”重点学科（风景园林学）（林人发［2016］21 号）；湖南省高等学校“双一流”建设项目（湘教通[2018]469 号）资助
作者简介：吴家荣，男，1995 年生，硕士研究生。主要从事景观规划设计和地理信息研究。E-mail:rong11728@foxmail.com
Fund：supported by the Wildlife Protection Project of State Forestry Administration and Department of Wildlife Conservation of Shaoguan (2016ZWZY06)；the 13th Five-Year Key Subject(Landscape Architecture) of the National Forestry and Grassland Administration (Linrenfa [2016]21)；the “Double First Class” Construction Program of the Hunan Colleges (Xiangjiaotong [2018]469).
网络首发时间：2020-06-16 15:32:48　网络首发地址：https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1253.Q.20200616.0941.001.html

geomorphologic genesis types were significantly different in the ecological detection of spatial distribution correlation of F. danxiaensis. The spatial distribution of F. danxiaensis was significantly correlated with soil subtypes, geomorphologic genesis types and annual sunlight ratios, which also indicated that the GeoDetector provided useful methods for vegetation habitat factor analysis and species distribution prediction.

Key words Firmiana danxiaensis；habitat factor；GeoDetector；spatial correlation

丹霞梧桐（Firmiana danxiaensis）隶属于梧桐科（Sterculiaceae），是我国特有种，为国家Ⅱ级重点保护植物[1-3]，于 1986 年在丹霞山首次被发现并采集标本，目前仅在广东南雄丹霞梧桐县级自然保护区和广东丹霞山国家级自然保护区被发现[2-5]。该种目前处于极度濒危状态，被纳入到广东省 17 种极小种群野生植物保护实施计划。丹霞梧桐树形优美，花色紫红绚丽，秋色叶为黄色，果形奇特，具有很高的观赏价值，是良好的园林观赏绿化树种和先锋树种[2,6]。

对丹霞梧桐生境因子的研究主要集中于地理区系、微地貌环境、遗传基因等方面。如罗晓莹等[6]在仁化丹霞山对丹霞梧桐群落的植物地理区系成分进行分析，得出此区域植物区系具有明显的南亚热带北缘性质；欧阳杰等[7]利用 GIS 分析丹霞梧桐空间分布的微地貌环境，发现丹霞梧桐主要分布在海拔 180 m、坡度 60 °且土壤比较贫瘠的区域；武星彤等[1]利用 EST-SSR 分子标记位点分析丹霞梧桐群体的遗传多样性和遗传结构，发现不同的地理组群之间存在显著的遗传分化，但遗传变异主要存在于群体内；王卫等[8]以高程、坡度、坡向作为主要环境变量，利用 Maxent 预测丹霞梧桐在丹霞山中的潜在适生区。然而目前对中国两个丹霞梧桐发现地之间的生境比较以及丹霞梧桐与特有的丹霞地貌生境的相关性研究较少。

地理探测器的理论核心是通过空间异质性来探测因变量与自变量的空间分布格局的一致性，据此度量因变量对自变量的解释度，即 q 值[9]，并解释因子与分析变量之间的相互关系。既可以探测数值型数据，也可以探测定性数据，这是地理探测器的优势之一；其另一个独特的优势是探测两因子交互作用与因变量的关系，即可分别比较各单一因子 q 值以及双因子交互作用[10-11]，判断其是否存在交互作用以及交互作用的强弱、方向、线性还是非线性等，双因子叠加既包括相乘关系，也包括其他关系，只要有关系，就能被检验出来[12-14]。

本研究基于地理探测器的 3 个模型（分异及因子探测、交互探测、生态探测），对丹霞梧桐在两个发现区内选取相同的生境因子分别进行评估并比较，分析丹霞梧桐的主要生境因子和特殊生境因子，检验丹霞梧桐与所在地的地理要素是否存在强相关性以及地理探测器探测植物生境因子的可行性，为预测丹霞梧桐空间分布与保护丹霞梧桐及其生境提供有力的科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

广东南雄丹霞梧桐县级自然保护区（后文简称“南雄丹霞”，图 1）（25°05′40″—25°07′30″ N，114°09′50″—114°14′17″ E）位于广东省韶关市南雄市全安镇苍石寨，研究区域（全域）面积 23.63 km^2。南雄丹霞多年最高气温 37.4 ℃，最低气温-1.4 ℃，年均气温 19.9 ℃，年降水量 1550 mm，年均日照 1825.7 h，主要土壤亚类为紫红色厚层砂页岩、紫红色粉砂岩夹砾岩等[15-17]。

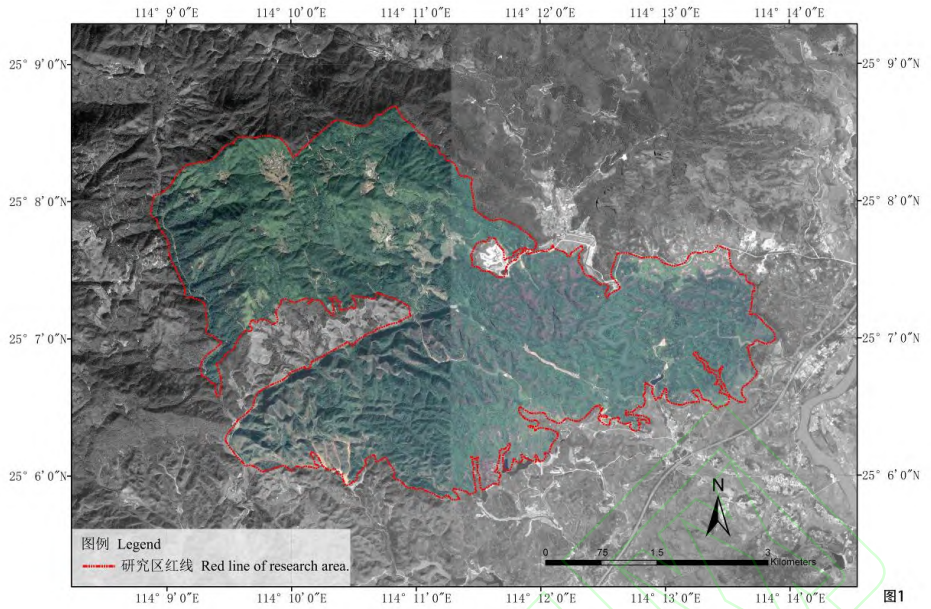

图 1 广东南雄丹霞梧桐县级自然保护区范围[11]
Fig.1 Area of Firminana danxiaens Nature Reserve in Nanxiong City, Guangdong[11].

广东丹霞山旅游风景区（核心景区）（后文简称“丹霞山”，图 2）（24°59′53″—25°03′13″ N，113°40′44″—113°45′11″ E）位于广东省韶关市仁化县南部的丹霞山国家级自然保护区的东北部，是世界“丹霞地貌命名地”的中国丹霞世界自然遗产地之一。研究区域面积 24.55 km^2，多年最高气温 40.9 ℃，最低气温-5.4 ℃，年均气温 19.7 ℃，年降水量 1715 mm，年均日照 1721 h，主要土壤亚类为红壤，综合肥力较低，呈酸性至强酸性[17-18]。

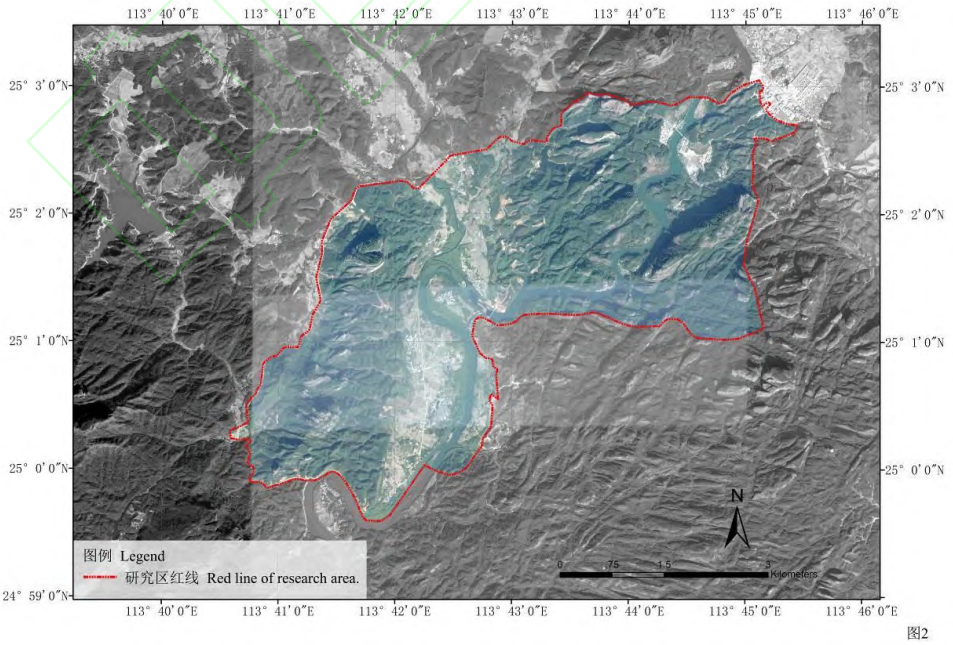

图 2 广东丹霞山旅游风景区（核心景区）范围[14-15]
Fig.2 Danxia Mountain Tourism Scenic (core scenic area) in Guangdong Province[14-15].

1.2 数据来源及处理

南雄丹霞的丹霞梧桐分布点数据来源于《广东南雄丹霞梧桐县级自然保护区综合科学考察报告》[11]；丹霞山的丹霞梧桐分布点数据主要源于文献[18-19]。韶关市数字高程模型（DEM，分辨率 30 m）数据来源于 LocaSpace Viewer；中国 1：100 万数字地貌数据（G-49 衡阳）、中国 1:100 万数字地貌数据（G-50 福州）、广东省 1：100 万土壤亚类图（2018 年）、广东省 30 m 土地覆被数据（2010 年）、中国多年 1 km 分辨率月降水数据集（1970—2015 年）、中国 1 km 分辨率年日照时数数据集（1981—2015 年）、中国 1 km 分辨率年相对湿度数据集（1981—2015 年）、中国 1 km 分辨率年平均风速数据集（1981—2015 年）、中国 1 km 分辨率年平均气温数据集（1981—2015 年）来源于国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心（http://www.geodata.cn）。

根据现有的调研与文献资料，丹霞梧桐是中国丹霞地貌的特有种，其主要生长在海拔 100~300 m、坡度大于 30°的西北坡和东南坡的土壤贫瘠的红色砂岩上[5,13-14]。因此，本研究选取地貌形态成因类型、土壤亚类（亚类）、土地覆被类型、高程、坡度、坡向以及多年平均降水、相对湿度、日照时数、气温、风速共 11 个丹霞梧桐生境潜在的影响因子进行分析。

本研究使用 ArcGIS 工具中的 Clip 或 Extract by Mask 对地理要素和自然要素进行数据裁剪并根据需求进行重分类（Reclassify），对南雄丹霞和丹霞山的丹霞梧桐 142 处分布点进行核密度分析（Core Analysis）得到发生率分布图，最后通过工具 Extract Multi Values To Points 提取数据至 30 m×30 m 的网格点中，导出到 GeoDetector 中进行计算（图 3，图 4）。

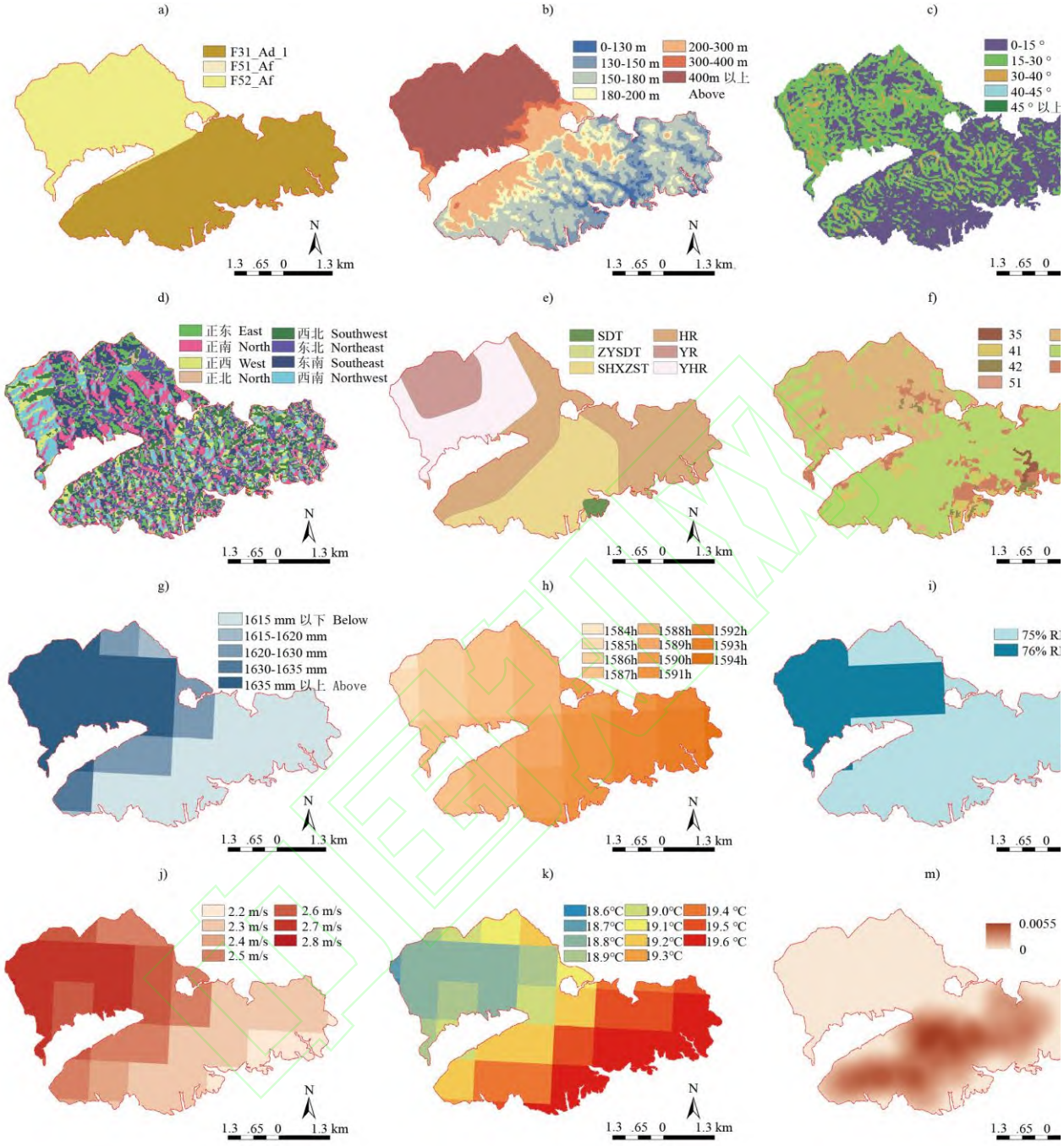

图 3 广东南雄丹霞梧桐县级自然保护区各生境因子及丹霞梧桐的空间分布

Fig.3 Habitat factors of Firminana danxiaens Nature Reserve in Nanxiong City and spatial distribution of Firminana danxiaens.

a) 地貌形态成因类型 Geomorphologic genesis type; b) 高程 Elevation; c) 坡度 Slope; d) 坡向 Aspect; e) 土壤亚类 Soil subtypes; f) 土地覆被类型 Land cover type; g) 年均降水 Annual average precipitation; h) 年日照时数 Annual sunlight ratio; i) 年均相对湿度 Mean annual relative humidity (RH); j) 年均风速 Mean annual wind speed; k) 年均气温 Mean annual temperature; m) 丹霞梧桐空间分布密度 Spatial distribution density of Firminana danxiaens. F11_C: 河谷平原 Valley plain; F11_F: 侵蚀剥蚀缓低山 Erosion-denudation sustained-low-mountain; F31_Ad_1: 侵蚀剥蚀平缓低丘陵 Erosion-denudation-gentle low-hilly; F31_Ad_2: 冲积平原 Alluvial plain; F41_Ad: 侵蚀剥蚀平缓低丘陵 Erosion-denudation-gentle low-hilly; F41_A:e 侵蚀剥蚀平缓低山 Erosion-denudation-gentle low-mountain; F51_Af: 侵蚀剥蚀陡低山 Erosion-denudation steep-low-mountain; F52_Af: 侵蚀剥蚀陡中山 Erosion-denudation steep-middle-mountain. 35: 水库/坑塘 Reservoir / Ponds; 36: 河流 River; 41: 水田 Paddy; 42: 旱地 Dry land; 51: 居住地 Residential land; 66: 裸土 Bare soil; 101: 常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest; 103: 常绿针叶林 Evergreen coniferous forest; 105: 针阔混交林 Mixed wood; 109: 乔木园地 Arbor garden-plot. SYSDT: 渗育水稻土 Percogenic paddy soil; QYSDT: 潜育水稻土 Gleyed paddy soil; HR: 红壤 Red soil; SDT: 水稻土 Paddy soil; ZYSDT: 潴育水稻土 Periodical waterlogged paddy soil; SHXZST: 石灰性紫色土 Calcareous purple soil; YR: 黄壤 Yellow soil; YHR: 黄红壤 Yellow-red soil.下同 The same below.

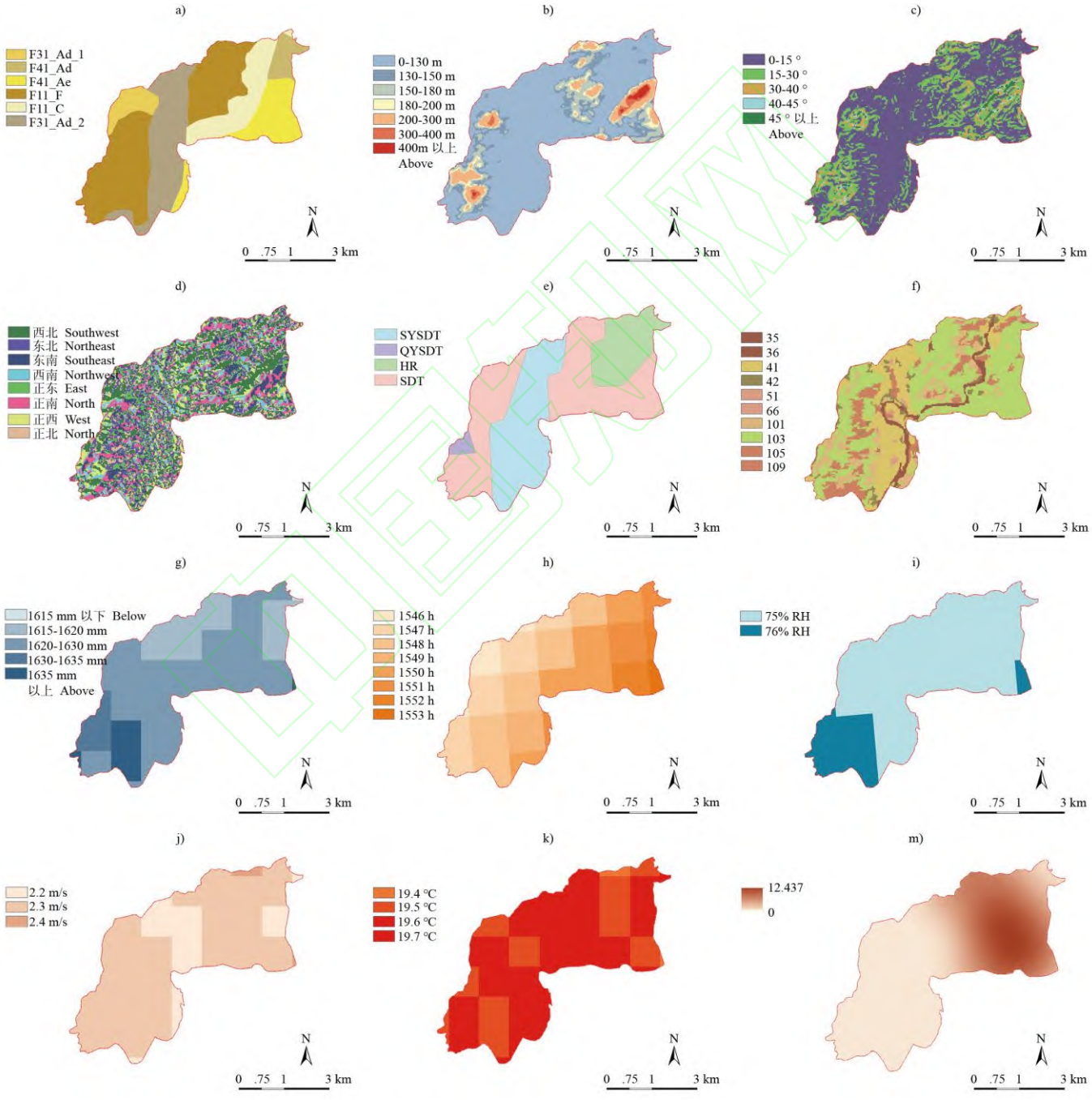

图 4 广东丹霞山旅游风景区（核心景区）各生境因子及丹霞梧桐的空间分布

Fig.4 Habitat factors of Danxia Mountain Tourism Scenic (core scenic area) in Guangdong Province and spatial distribution of Firminana danxiaens.

1.3　地理探测器原理与方法

地理探测器(GeoDetector)是探测主要影响因子与空间分异的工具，用 q 值衡量自变量与因变量空间分异的影响力[20-21]。其包含分异及因子探测器、交互作用探测器、生态探测器、风险探测器共 4 个探测器[12-14]。本文根据研究需要，仅采用以下 3 个探测器：

1）分异及因子探测：用于探测丹霞梧桐的空间分异性，以及探测生境中各因子与丹霞梧桐空间分布的相关程度，用 q 值来度量，表达式为：

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2}{N\sigma^2}=1-\frac{SSW}{SST}$$

式中：q 是衡量各生境因子与丹霞梧桐空间分布的相关性的值；N、σ^2 分别为样本量和方差；N_h 和 σ_h^2 为 h 层样本量和方差；q 的值域[0,1]，q 值越大，表示生境因子与丹霞梧桐空间分布的相关性越强，反之越弱；极端情况下，若 q=1 时，表明该生境因子完全控制丹霞梧桐的空间分布，若 q=0 时，则表明该生境因子与丹霞梧桐的空间分布无关[22-23]。

2）交互作用探测：用于识别不同因子之间的交互作用，与传统统计分析方法相比，其能够同时分析 2 个变量之间的交互作用[21]对丹霞梧桐空间分布的影响，即评估丹霞梧桐生境中任意两个因子是相互作用还是独立作用，若是相互作用，则是增强还是减弱。两个因子之间可以分为 5 种关系：非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、独立、非线性增强[12-14]。

3）生态探测：通过地理探测器的生态探测器模块，评估南雄丹霞与丹霞山的丹霞梧桐生境任意两个因子 X_1 和 X_2 与丹霞梧桐空间分布的相关性是否具有显著差异[24-25]。表达式为：

$$F=1-\frac{N_{x1}(N_{x2}-1)SSW_{x1}}{N_{x2}(N_{x1}-1)SSW_{x2}}$$

$$SSW_{x1}=\sum_{h=1}^{L1}N_h\sigma_h^2$$

$$SSW_{x2}=\sum_{h=1}^{L2}N_h\sigma_h^2$$

式中：F 为检验值；N_{X1} 和 N_{X2} 分别表示两个因子的样本量；SSW_{X1} 和 SSW_{X2} 分别表示由两个因子形成的分层的层内方差之和；L_1 和 L_2 分别表示两因子的分层数目。模型零假设 H_0：$SSW_{X1}=SSW_{X2}$，若在 0.05 显著性水平上拒绝 H_0，说明两因子之间存在显著差异，关联值为“Y”，关联值“N”表示不存在显著差异[12-14,22]。

2　结果与分析

2.1　广东南雄丹霞梧桐县级自然保护区的丹霞梧桐生境因子相关性

2.1.1 丹霞梧桐空间分布与各因子的相关性

通过地理探测器的分异及因子探测器模块，评估南雄丹霞的丹霞梧桐各生境因子与丹霞梧桐空间分布的相关性（即 q 值）。结果表明：土壤亚类（0.706）＞年日照时数（0.671）＞高程（0.584）＞年均气温（0.569）＞地貌形态成因类型（0.539）＞年均风速（0.454）＞年均降水（0.441）＞年均相对湿度（0.376）＞土地覆被类型（0.359）＞坡度（0.060）＞坡向（0.026）。由此可知，土壤亚类与丹霞梧桐空间分布的相关性最强；年日照时数、高程、年均气温、地貌形态成因类型的 q 值大于均值（0.479），说明与南雄丹霞的丹霞梧桐空间分布相关性均较强，这与一般植物的生境因子及前人探究丹霞梧桐生境选取的因子有所区别[7-8]。

2.1.2 丹霞梧桐空间分布与各生境因子交互的相关性

通过地理探测器的交互作用探测器模块得出结果可知（表 1），相关性最强的 4 组交互作用的生境因子分别是：地貌形态成因类型∩年日照时数（0.843）、年日照时数∩年均气温（0.840）、高程∩

年日照时数（0.839）、土壤亚类∩年日照时数（0.812），其交互作用下的相关性均表现为双因子增强。结合分异及因子探测器和交互作用探测器的结果表明，南雄丹霞的年日照时数和土壤亚类对丹霞梧桐空间分布的影响强于其他生境因子，说明在年日照时数相似的区域，丹霞梧桐空间分布与地貌形态成因类型和土壤亚类的相关性最强。

表1 南雄丹霞梧桐县级自然保护区交互作用探测器分析结果

Table 1 Interaction detector analysis results of the Firminana danxiaens county-level nature reserves in Nanxiong City

生境因子 Habitat factor	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
B	0.732*	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C	0.547	0.731*	-	-	-	-	-	-	-	-
D	0.617	0.789*	0.606	-	-	-	-	-	-	-
E	0.547	0.709*	0.378	0.588	-	-	-	-	-	-
F	0.543	0.709*	0.378	0.590	0.092	-	-	-	-	-
G	0.598	0.771	0.555	0.643	0.452	0.468	-	-	-	-
H	0.843**	0.812**	0.803**	0.839**	0.697	0.690	0.810**	-	-	-
I	0.543	0.716*	0.522	0.609	0.380	0.388	0.463	0.705*	-	-
J	0.628	0.788*	0.642	0.675	0.580	0.585	0.663	0.840**	0.578	-
K	0.610	0.742*	0.591	0.656	0.467	0.478	0.504	0.770*	0.473	0.586

A: 地貌形态成因类型 Genetic type of geomorphologic shape; B: 土壤亚类 Soil subtype; C: 土地覆被类型 Land-cover type; D: 高程 Elevation; E: 坡度 Slope; F: 坡向 Aspect; G: 年均降水 Annual average precipitation; H: 年日照时数 Annual sunlight hours; I: 年均相对湿度 Mean annual relative humidity; J: 年均气温 Mean annual temperature; K: 年均风速 Mean annual wind speed. *P<0.05; **P<0.01. 下同 The same below.

2.1.3 生态探测结果

由表 2 可以看出，南雄丹霞任意两生境因子之间与丹霞梧桐空间分布的关联值均为“Y”，且达到 0.05 显著性水平，表明南雄丹霞的任意两生境因子之间与丹霞梧桐空间分布的相关性具有显著差异。结合分异及因子探测结果表明，土壤亚类、年日照时数、高程、年均气温、地貌形态成因类型与丹霞梧桐的空间分布都具有显著的相关性。

表2 南雄丹霞梧桐县级自然保护区生态探测器分析结果

Table 2 Ecological detector analysis results of the Firminana danxiaens county-level nature reserves in Nanxiong City

生境因子 Habitat factor	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
B	Y									
C	Y	Y								
D	Y	Y	Y							
E	Y	Y	Y	Y						
F	Y	Y	Y	Y	Y					
G	Y	Y	Y	Y	Y	Y				
H	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y			
I	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y		
J	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	
K	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y

Y: 显著差异 Significant difference. 下同 The same below.

2.2 广东丹霞山旅游风景区（核心景区）的丹霞梧桐生境因子相关性

2.2.1 丹霞梧桐空间分布与各因子的相关性

通过地理探测器的分异及因子探测器模块，评估丹霞山各生境因子与丹霞梧桐空间分布的相关性（q 值）。结果表明：土壤亚类（0.444）＞年日照时数（0.436）＞地貌形态成因类型（0.406）＞年均降水（0.137）＞年均相对湿度（0.112）＞土地覆被类型（0.097）＞高程（0.083）＞坡度（0.037）＞年均气温（0.037）＞坡向（0.013）＞年均风速（0.006）。由此可知，土壤亚类与丹霞梧桐空间分

布的相关性最强；年日照时数、地貌形态成因类型的 q 值均超过均值（0.181），与丹霞山的丹霞梧桐空间分布相关性均较强，这与一般植物及前人研究丹霞梧桐生境选取的主要因子有所区别[7-8]，表明丹霞梧桐空间分布与土壤亚类、年日照时数、丹霞地貌具有较强的相关性。

2.2.2 丹霞梧桐空间分布与各生境因子交互的相关性

通过地理探测器的交互作用探测器模块得出结果可知（表 3），相关性最强的 4 组交互作用的生境因子分别是：地貌形态成因类型∩年日照时数（0.658）、土壤亚类∩年日照时数（0.653）、土壤亚类∩年均降水（0.621）、土壤亚类∩地貌形态成因类型（0.616），其中，土壤亚类∩年均降水表现为非线性增强，可以排除其相关性评估，其余交互作用的生境因子均表现为双因子增强。结合分异及因子探测器和交互作用探测器的结果表明，丹霞山的年日照时数和土壤亚类对丹霞梧桐空间分布的影响强于其他环境因子，说明在年日照时数相似的区域，丹霞梧桐空间分布与地貌形态成因类型和土壤亚类的相关性最强。

表3　丹霞山旅游风景区（核心景区）交互作用探测器分析结果

Table 3 Interaction detector analysis results of Danxia Mountain Tourism Scenic Area (core scenic area)

生境因子 Habitat factor	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
B	0.616**									
C	0.485	0.506*								
D	0.468	0.524*	0.147							
E	0.430	0.459	0.116	0.101						
F	0.417	0.451	0.115	0.097	0.060					
G	0.591*	0.621**	0.272	0.256	0.198	0.150				
H	0.658**	0.653**	0.531*	0.535*	0.477	0.463	0.555*			
I	0.536*	0.511*	0.260	0.243	0.185	0.124	0.161	0.494		
J	0.511*	0.520*	0.184	0.159	0.085	0.054	0.273	0.537*	0.157	
K	0.433	0.460	0.112	0.127	0.075	0.022	0.198	0.477	0.124	0.037

2.2.3 生态探测结果

由表 4 可以看出，丹霞山的土地覆被类型和高程、土地覆被类型和年均相对湿度、土壤亚类和年日照时数、坡度和年均气温、坡向和年均风速之间与丹霞梧桐空间分布的关联值均为“N”，表明上述因子之间与丹霞梧桐空间分布的相关性不具有显著差异；丹霞山其余的两因子之间与丹霞梧桐空间分布的关联值为“Y”，表明因子之间与丹霞梧桐空间分布的相关性具有显著差异。结合分异及因子探测结果表明，土壤亚类、年日照时数、地貌形态成因类型与丹霞梧桐空间分布具有显著的相关性。

表4　丹霞山旅游风景区（核心景区）生态探测器分析结果

Table 4 Ecological detector analysis results of Danxia Mountain Tourism Scenic Area (Core scenic area)

生境因子 Habitat factor	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
B	Y	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C	Y	Y	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D	Y	Y	N	-	-	-	-	-	-	-	-
E	Y	Y	Y	Y	-	-	-	-	-	-	-
F	Y	Y	Y	Y	Y	-	-	-	-	-	-
G	Y	Y	Y	Y	Y	Y	-	-	-	-	-
H	Y	N	Y	Y	Y	Y	Y	-	-	-	-
I	Y	Y	N	Y	Y	Y	Y	Y	-	-	-
J	Y	Y	Y	Y	N	Y	Y	Y	Y	-	-
K	Y	Y	Y	Y	Y	N	Y	Y	Y	Y	-

N: 不存在显著差异 No significant difference.

3 讨 论

根据实地调查与文献发现，丹霞梧桐目前仅在南雄丹霞梧桐县级自然保护区与广东丹霞山旅游风景区分布[3]。丹霞梧桐作为丹霞地貌的特有种，要预测其分布不仅要考虑一般植物的生境因子（降水、气温、高程、坡度、坡向等），还要考虑潜在的生境因子（土壤、地貌、土地覆被、风速、相对湿度等），才能更加准确地预测出其潜在适生区。本研究在一般植物的生境因子（降水、气温、高程、坡度、坡向等）的基础上，增加了土壤亚类、地貌形态成因类型、土地覆被类型、年均风速、相对湿度等生境因子，分析其与丹霞梧桐空间分布的相关性。结果表明，一般植物的生境因子在本研究中并没有反映出较强相关性，而潜在生境因子中的土壤亚类、年日照时数、地貌形态成因类型呈现显著的强相关性。因此，在后续的丹霞梧桐潜在适生区的模拟预测中，应区别于一般植物的生境，着重从潜在生境因子入手，将土壤、地貌、日照作为重要的影响因子，这与目前已有的基于高程、坡度、坡向预测丹霞梧桐潜在适生区[8]的研究有所差异。

有研究表明，丹霞山与南雄丹霞中的丹霞梧桐植株形态存在一定差异，丹霞山的丹霞梧桐平均冠幅、胸径和树体高度小于南雄丹霞，南雄丹霞的丹霞梧桐长势更好[17]。结合本研究两地的因子探测结果来看，南雄丹霞各因子的 q 值基本大于丹霞山，同时南雄丹霞在交互作用中表现为所有的双因子均增强，而丹霞山存在双因子非线性增强，表明南雄丹霞的生境可能更适合丹霞梧桐生长，这与陈璐等[17]的研究结果较为一致，表明地理探测器能为植被生境因子分析、预测物种分布等研究提供有益的探索方法。

对于丹霞梧桐生境因子的研究仍需进一步验证。本研究得出的强相关性结果更倾向于地理要素，这可能与目前发现丹霞梧桐的两个生境有相似的地貌有关，可以在此基础上细分为土壤组成成分、土壤温湿度、岩层组成成分等[26-27]再深入分析；其次，本研究仅处于对区域性的地理与气候要素的研究层面，缺少更精确的微气候数据支撑，未来可对丹霞梧桐主要分布点的太阳辐射强度、太阳高度角、最旱季降水量等方面加以分析，从而得出丹霞梧桐的生境是否与气候带或微气候相关；对于其伴生植物的相关性分析、植物区系分析等方面以及人为要素[22,28]的影响因子相关性研究，也将是进一步的研究方向。另外，地理探测器输入数据为类型量，需要把数值数据重分类，然而不同离散方法以及不同分析格点大小所得的 q 值并非完全一致，后续将会尝试不同离散方法进行更深入的研究。

责任编辑 杨 弘

参考文献

[1] 武星彤， 陈璐， 王敏求， 等. 丹霞梧桐群体遗传结构及其遗传分化. 生物多样性， 2018， 26（11）： 1168-1179 [Wu X-T， Chen L， Wang M-Q， et al. Population structure and genetic divergence in Firmiana danxiaensis. Biodiversity Science， 2018， 26（11）： 1168-1179]

[2] 张薇， 黄雅婷， 钟平生， 等. 珍稀濒危植物丹霞梧桐种子萌发特性研究. 林业与环境科学， 2018， 34（6）： 51-55 [Zhang W， Huang Y-T， Zhong P-S， et al. Study on the characteristics of seed germination of the endangered plant Firmiana danxiaensis. Forestry and Environmental Science， 2018， 34（6）： 51-55]

[3] 廖庆文， 朱报著. 广东国家重点保护野生植物及其分布. 中南林业调查规划， 2003， 22（2）： 39-42 [Liao Q-W， Zhu B-Z. National key protected wild plants and their distribution in Guangdong. Central South Forest Inventory and Planning， 2003， 22（2）： 39-42]

[4] 徐祥浩， 丘华兴， 徐颂军. 中国梧桐科植物的新种和新变种. 华南农业大学学报， 1987， 8（3）： 1-5 [Xu X-H， Qiu H-X， Xu S-J. New species and variety of Sterculiaceae from China. Journal of South China Agricultural University， 1987， 8（3）： 1-5]

[5] 廖春花， 张卿雄. 丹霞梧桐栖身全安苍石寨. 韶关日报， 2015， A01 [Liao CH， Zhang QX. Firmiana danxiaensis dwell in Cangshi village， Quan’an town. Shaoguan Daily， 2015， A01]

[6] 罗晓莹， 陈秋慧， 蔡纯榕， 等. 极小种群植物丹霞梧桐群落的地理区系成分分析. 韶关学院学报， 2015， 36（12）： 28-31 [Luo X-Y， Chen Q-H， Cai C-R， et al. Analysis on geographical elements of the community of plant species with extremely small population Firmiana danxiaensis. Journal of Shaoguan University， 2015， 36（12）： 28-31]

[7] 欧阳杰， 彭华， 罗晓莹， 等. 丹霞山国家珍稀濒危保护植物丹霞梧桐空间分布的微地貌环境特征研究. 地理科学， 2017， 37（10）： 1585-1592 [Ouyang J， Peng H， Luo X-Y， et al. Environmental features of the micro-landforms of the spatial distribution of the National Rare Species of on the Danxiashan Mountain. Scientia Geographica Sinica， 2017， 37（10）： 1585–1592]

[8] 王卫， 杨俊杰， 罗晓莹， 等. 基于 Maxent 模型的丹霞山国家级自然保护区极小种群植物丹霞梧桐的潜在生境评价. 林业科

学， 2019， 55（8）： 19-27 [Wang W， Yang J-J， Luo X-Y， et al. Assessment of potential habitat for Firmiana danxiaensis，a plant species with extremely small population in Danxiashan national nature reserve based on Maxent model. Scientia Silvae Sinicae，2019， 55（8）： 19-27]

[9] 王正雄， 蒋勇军， 张远嘱， 等. 基于 GIS 与地理探测器的岩溶槽谷石漠化空间分布及驱动因素分析. 地理学报， 2019， 74（5）： 1025-1039 [Wang Z-H， Jiang Y-J， Zhang Y-Z， et al. Spatial distribution and driving factors of karst rocky desertification based on GIS and GeoDetectors. Acta Geographica Sinica， 2019， 74（5）： 1025-1039]

[10] 刘吉平， 马长迪， 刘雁， 等. 基于地理探测器的沼泽湿地变化驱动因子定量分析——以小三江平原为例. 东北师大学报：自然科学版， 2017， 49（2）： 127-135 [Liu J-P， Ma C-D， Liu Y， et al. Quantitative study on the driving factors of marsh change based in geographical detector： Case study on Small Sanjiang Plain. Journal of Northeast Normal University： Natural Science， 2017， 49（2）： 127-135]

[11] 孙泽乾， 杨晓霞， 曾于珈. 基于地理探测器的重庆市旅游发展水平空间分异影响因子研究. 西南师范大学学报：自然科学版，2019， 44（4）： 57-63 [Sun Z-Q， Yang X-X， Zeng Y-J. Influence factors of spatial differentiation of tourism development level in Chongqing based on geographical detector. Journal of Southwest China Normal University： Natural Science， 2019， 44（4）： 57-63]

[12] Wang JF, Li XH, George C, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24: 107–127

[13] Wang JF, Zhang TL, Fu BJ. A measure of spatial stratified heterogeneity. Ecological Indicators Integrating, Monitoring, Assessment and Management, 2016, 67: 250-256

[14] 王劲峰， 徐成东. 地理探测器：原理与展望. 地理学报， 2017， 72（1）： 116-134 [Wang J-F， Xu C-D. GeoDetector： Principle and prospective. Acta Geographica Sinica， 2017， 72（1）： 116–134]

[15] 中南林业科技大学. 广东南雄丹霞梧桐县级自然保护区综合科学考察报告. 南雄： 南雄市林业局， 2016 [Central South University of Forestry and Technology. Report on Comprehensive Scientific Investigation of Danxiawutong County Nature Reserve. Nanxiong： Department of Natural Resources of Nanxiong City， 2016]

[16] 胡纯. 南雄丹霞梧桐自然保护区植物多样性评价研究. 硕士论文. 长沙： 中南林业科技大学， 2018 [Hu C. A Study on Plant Diversity Evaluation in Danxia Wutong Nature Reserve in Nanxiong City. Master Thesis. Changsha： Central South University of Forestry and Technology， 2018]

[17] 陈璐， 周宏， 王敏求， 等. 丹霞梧桐群落特征比较研究. 中国野生植物资源， 2018， 37（2）： 46-49 [Chen L， Zhou H， Wang M-Q， et al. Community characteristics comparison of Firmiana danxiaensis species. Chinese Wild Plant Resources， 2018， 37（2）： 46-49]

[18] 欧阳杰. 丹霞山国家重点保护野生植物丹霞梧桐生态保护红线研究. 地理科学， 2019， 39（7）： 1166-1173 [Ouyang J. The ecological redlines of national rare and endangered species of Firmiana danxiaensis in the Danxia Mountain. Scientia Geographica Sinica， 2019， 39（7）： 1166-1173]

[19] Ouyang J, Luo XY, Simoncon SL et al. Determining the number and distribution of Firmiana danxiaensis, a rare and endangered plant species in Danxiashan, South China, using DEM data and UAV technology. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019, 227: 052005

[20] 朱琪， 周旺明， 贾翔， 等. 长白山国家自然保护区及其周边地区生态脆弱性评估. 应用生态学报， 2019： 30（5）： 1633-1641 [Zhu Q， Zhou W-M， Jia X， et al. Ecological vulnerability assessment on Changbai Mountain Nature Reserve and its surrounding areas， Northeast China. Chinese Journal of Applied Ecology， 2019， 30（5）： 1633-1641]

[21] 熊小菊， 廖春贵， 陈月连， 等. 地理因子对北部湾经济区植被覆盖的影响. 江苏农业科学， 2019， 47（7）： 268-273 [Xiong X-G， Liao C-G， Chen Y-L， et al. Effects of geographical factors on vegetation coverage in north harbor economic zone. Jiangsu Agricultural Sciences， 2019， 47（7）： 268-273]

[22] 李志鹏， 赵健， 陈业滨， 等. 福建省主要入侵植物空间分异及其影响因素. 应用生态学报， 2019， 30（8）： 2682-2690 [Li Z-P， Zhao J， Chen Y-B， et al. Spatial variation and driving factors of invasive plants in Fujian Province， China. Chinese Journal of Applied Ecology， 2019， 30（8）： 2682-2690]

[23] 廖颖， 王心源， 周俊明. 基于地理探测器的大熊猫生境适宜度评价模型及验证. 地球信息科学学报， 2016， 18（6）： 767-778 [Liao Y， Wang X-Y， Zhou J-M. Suitability assessment and validation of Giant panda habitat based on geographical detector. Journal of Geo-Information Science， 2016， 18（6）： 767–778]

[24] 梁巧霞， 黄杰， 谢霞， 等. 基于地理探测器的天山北坡旅游空间分异特征及其影响因素研究. 西北师范大学学报：自然科学版， 2018， 54（6）：82-88 [Liang Q-X， Huang J， Xie X， et al. Study on tourism spatial differentiation characteristics and influencing factors in northern slope of Tiabshan Mountains based on Geodetecto. Journal of Northwest Normal University： Natural Science， 2018， 54（6）： 82–88]

[25] 贺倩， 杨雪琴， 戴晓爱. 2010—2015 年三江源植被净初级生产力变化特征及影响因素分析. 长江科学院院报， 2020（3）：1-8 [He Q， Yang X-Q， Dai X-A. Variation characteristics and influence factors of net primary productivity of vegetation in the Three-River Headwaters Region from 2010 to 2015. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute， 2020（3）： 1–8]

[26] 段媛媛， 宋丽娟， 牛素旗， 等. 不同林龄刺槐叶功能性状差异及其与土壤养分的关系. 应用生态学报， 2017， 28（1）：28-36 [Duan Y-Y， Song L-J， Niu S-Q， et al. Variation in leaf functional traits of different-aged Robinia pseudoacacia communities and relationships with soil nutrients. Chinese Journal of Applied Ecology， 2017， 28（1）： 28-36]

[27] 裴志林， 杨勤科， 王春梅， 等. 黄河上游植被覆盖度空间分布特征及其影响因素. 干旱区研究， 2019， 36（3）： 546-555 [Pei Z-L， Yang Q-K， Wang C-M， et al. Spatial distribution characteristic and its influencing factors of the vegetation cover of the upper yellow river based on the geographical detector. Arid Zone Research， 2019， 36（3）： 546-555]

[28] 付为国， 李萍萍， 吴沿友， 等. 镇江内江湿地不同演替阶段植物群落小气候日动态. 应用生态学报， 2006， 17（9）：1699-1704 [Fu W-G， Li P-P， Wu Y-Y， et al. Diurnal dynamics of microclimate at different succession stages of vegetation comm unities in inner-river wet land of Zhenjiang City. Chinese Journal of Applied Ecology， 2006， 17（9）： 1699-1704]